مجلّه‌ی جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره‌ی چهاردهم، بهار و تابستان ۱۳۸۹

مقایسه‌ی روش تجربی بهینه برای برآورد تابش با مقیاس‌های زمانی مختلف در ناحیه‌ی اقلیمی مشهد

محمد موسوی بایگی (دانشیار هواشناسی دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده مسؤول)
mousavi500@yahoo.com
بتول اشرف (دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد)

چکیده

تابش خورشیدی، یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در توازن حرارتی جو زمین بوده و مبنای بسیاری از مطالعات اقلیمی است. با توجه به نبود امکان استفاده از پیرانومتر در همه، روش‌های تجربی بسیاری برای برآورد آن توسط محققان در سراسر جهان پیشنهاد شده است. در این تحقیق از هفت الگوی پیشنهادی که برای اقلیم نیمه خشک مشهد واسنجی شده است، برای انتخاب بهترین الگوی برآورد تابش خورشیدی در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده شده است. این الگوها عبارت‌اند از الگوی آنگستروم- پرسکات پیشنهادی توسط فائو، الگوی آنگستروم- پرسکات واسنجی شده توسط خلیلی و رضایی صدر شماره ۱ و ۲، الگوی آنگستروم- پرسکات واسنجی شده توسط علیزاده و خلیلی، الگوی رگرسیون خطی علیزاده و خلیلی، الگوی صباغ و الگوی گلور- مک کلوت. بررسی نتایج در دو مقیاس روزانه و ماهانه (متوسط روزانه در ماه) نشان داد که در مقیاس روزانه الگوی آنگستروم- پرسکات واسنجی شده توسط خلیلی و رضایی صدر که دارای $R^2 = 0.647$، $RMSE = 4.50$، $MBE = -0.37$ و $t = 0.80$ است و طیف جذبی بخارآب موجود در اتمسفر نیز در آن منظور شده است، بهترین الگوی برآورد تابش خورشیدی در اقلیم نیمه خشک مشهد می باشد. همچنین در این مقیاس، معادله‌ی آنگستروم – پرسکات شماره ۲ (واسنجی شده توسط خلیلی و رضایی صدر) و معادله‌ی رگرسیونی علیزاده و خلیلی در اولویت های بعدی قرار دارند. برای مقیاس ماهانه نیز، می‌توان الگوی گلور- مک کلوت را

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۲۹ تاریخ تصویب:۱۳۸۹/۹/۲

با $R^2 = 0.849$، $RMSE = 2.70$، $MBE = 0.08$ و $t = 0.29$ به عنوان بهترین الگوی برآورد تابش خورشیدی در این منطقه معرفی نمود.

کلیدواژه‌ها: اقلیم نیمه خشک مشهد، تابش طول موج کوتاه، طیف جذبی، الگوهای برآورد تابش خورشیدی، مقیاس روزانه و ماهانه.

درآمد:

تابش خورشیدی یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در توازن حرارتی جو زمین است و مبنای بسیاری از مطالعات اقلیمی است (۲)، به طوری که در هواشناسی کشاورزی، مدیریت آب و سایر علوم کاربرد دارد. بنابراین تعیین دقیق مقدار تابش خورشیدی در هر مکان از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از جمله دقیق ترین روش‌های اندازه گیری تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین، استفاده از پیرانومتر است که کاربرد آن هنوز در بسیاری از مناطق به دلیل نبود امکانات کافی محدود است. بنابراین باید با استفاده از روش‌های تجربی مناسب، مقدار آن را برآورد کرد (۵ و ۱۰). این مسأله باعث ترغیب دانشمندان و محققان به سوی ارائه و استفاده از الگوهای تابش شده است. مقادیر تابش به روش‌های مختلفی از جمله روابط تجربی و رگرسیونی، استفاده از فن سنجش از دور و شبکه‌های عصبی و میان‌یابی خطّی محاسبه می‌شوند (۲). اما از میان همه‌ی این روش‌ها، معادلات تجربی کاربرد گسترده‌تری داشته و از محبوبیّت بیشتری نیز بین کاربران برخوردار است.

به طور کلی معادلات تجربی برآورد تابش طول موج کوتاه خورشیدی را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد. اول معادلاتی که مبنای آن‌ها ساعات آفتابی است (٦ و ۱۳)، دوم معادلاتی که مبنای آن ها دمای هوا است (۷) و سوم معادلاتی که بر مبنای ابرناکی محاسبه می‌شوند (۸). اگرچه تعداد زیادی از پارامترهای هواشناسی مانند رطوبت نسبی، ابرناکی، دما و ساعات آفتابی بر مقدار تابش خورشیدی مؤثر هستند، اما تحقیقات متعدد نشان داده است که تأثیر ساعات آفتابی بر مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین، بیش از سایر پارامترهاست. بر این اساس معادلات مختلفی برای برآورد مقدار تابش خورشیدی پیشنهاد شده است که یکی از

مهمترین آن‌ها، معادله‌ی آنگستروم است که در سال ۱۹۲٤ ارائه شد (٦). این معادله بعدها توسط پرسکات اصلاح شد، که به معادله‌ی آنگستروم- پرسکات مشهور است (٥). پژوهشگران زیادی در سراسر دنیا به واسنجی این معادله برای مناطق مختلف پرداخته‌اند. تحقیقات یانگ نشان داد که معادله‌ی آنگستروم- پرسکات در مطالعات و الگوسازی‌های هیدرولوژی و کشاورزی کاربرد بسیار گسترده‌ای دارد (۲۱). آلموروکس و همکاران (٥) نیز تابش روزانه را برای منطقه‌ی تولدو[1] اسپانیا به روش آنگستروم- پرسکات مورد بررسی قرار دادند تا بهترین برآورد ماهانه را برای ضرایب این معادله به دست آورند. آن ها از پارامترهای آماری RMSE، MBE و t برای انتخاب بهترین ضرایب استفاده نمودند و سپس ضرایب را برای هر ماه به طور جداگانه محاسبه و معادله را واسنجی نمودند. رحمان (۱۵) با استفاده از شانزده الگوی مختلف برآورد تابش، مقادیر تابش محاسبه شده را در عربستان با مقادیر تابش اندازه‌گیری شده با پیرانومتر مقایسه کرد و از بین آن‌ها بهترین الگو را، که الگوی خطی آنگستروم- پرسکات با ضرایب a=0.3465 و b=0.352 بود، انتخاب نمود. الاجیب و همکارانش (۹) در بحرین، الگوی جدیدی برای برآورد تابش خورشیدی با کم‌ترین خطا و حداقل تعداد پارامترهای هواشناسی مورد نیاز و تنها با استفاده از داده‌های دما، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و تابش فرازمینی، ارائه کردند. در این تحقیق، بررسی داده‌ها برای ماه‌های ژانویه تا ژوئن و ژوئیه تا دسامبر، به طور جداگانه انجام شد و برای هر کدام سه معادله بر اساس ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و دما و نیز رطوبت نسبی، دما و ساعات آفتابی به دست آمد.

در سال ۲۰۰٦ اسکیکر (۱۸) در استان داماسکو سوریه با استفاده از هفت پارامتر مختلف هواشناسی و جغرافیایی، سیزده معادله یک تا هفت متغیّری را برای محاسبه‌ی تابش خورشیدی مورد بررسی قرار داد و با وجود قابل قبول بودن همه‌ی معادلات، معادله‌ی ارائه شده با هفت متغیّر را به عنوان بهترین الگو از نظر آماری انتخاب نمود. یانگ و همکاران (۲۱) نیز در سال ۲۰۰٦ الگوی جهانی برای برآورد تابش ساعتی، روزانه و متوسط روزانه در هر ماه ارائه نمودند. نکته‌ی مهم و جدید در این معادله، استفاده از پارامترهای فشار سطحی، توزیع جهانی

1. Toledo

ضخامت ازن، آب قابل بارش و توزیع جهانی ضریب تیرگی آنگستروم علاوه بر ساعات آفتابی است. طغرل و اونات (۲۰) با استفاده از شش پارامتر هواشناسی، معادله‌ی رگرسیونی خطی چند متغیّره‌ای برای برآورد تابش در منطقه الازیگ[1] ترکیه به دست آوردند. آن‌ها علاوه بر پارامترهای معمول از دمای خاک نیز استفاده نمودند. در تحقیق ارائه شده توسط ایزومون و مایر (۱۰) الگوهای کاستن (بر مبنای ابرناکی) و آنگستروم- پرسکات، گارج و سیوکف (بر مبنای ساعات آفتابی) مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در دو منطقه‌ی کوهستانی فلدبرگ[2] و منطقه‌ی مسطّح برمگارتن[3] انجام شد که در نهایت الگوی آنگستروم- پرسکات و گارج به عنوان بهترین الگوهای برآورد تابش خورشیدی انتخاب شدند. در ایران نیز سبزی‌پرور و شتایی در سال ۲۰۰۷، در نواحی خشک و نیمه خشک غرب و شرق ایران، شش معادله‌ی پالتریج، صباغ، دانشیار، پالتریج اصلاح شده، صباغ اصلاح شده و دانشیار اصلاح شده را مورد بررسی قرار داده و مقدار تابش را برآورد کردند (۱۷). موسوی بایگی و همکاران در یک اقلیم نیمه خشک الگوی انگستروم-پرسکات پیشنهادی توسط فائو را به عنوان مناسب ترین الگو معرفی کردند (۳). لوپز و همکاران نیز با استفاده از داده‌های تابش‌سنجی شش ایستگاه در اسپانیا، الگوهای مختلف تابش خورشیدی را ارزشیابی کردند (۱۲). همچنین سوزن، مقدار تابش خورشیدی را با استفاده از شبکه‌های عصبی برای مناطق مختلف کشور ترکیه محاسبه کرد که نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی قابل اعتماد بودن این تکنیک برای محاسبه‌ی تابش خورشیدی در اقلیم ترکیه می باشد(۱۹).

با توجه به این‌که تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین مبنای بسیاری از مطالعات اقلیمی است، در این تحقیق روش‌های تجربی پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف برای برآورد تابش خورشیدی در اقلیم نیمه خشک مشهد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با مقادیر

1. Elazig
2. Feldberg
3. Bremgarten

اندازه گیری‌شده توسط پیرانومتر مقایسه شد تا مناسب ترین معادله برای دست یـابی بـه نتـایج بهتر و دقیق‌تر در این منطقه تعیین شود.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه:

موقعیت مورد مطالعه در این تحقیق ایسـتگاه سـینوپتیک شـهر مشـهد در اسـتان خراسـان رضوی واقع در طول جغرافیایی ۵۹/۳۸ درجـه‌ی شـرقی، عـرض جغرافیـایی ۳۶/۱۶ درجـه‌ی شمالی و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا می‌باشد. شـهر مشـهد بـه دلیـل موقعیّـت جغرافیـایی خاص که در منطقـه‌ی مـرزی بـین شـمال و جنـوب خراسـان قـرار دارد و همچنـین تـداخل جبهه‌های مختلف آب و هوایی دارای آب و هوا و خصوصیات ویژه اقلیمی است. در مجمـوع این شهر دارای آب و هوای متغیر، اما معتدل و متمایل به سرد و خشک است. میانگین ساعات آفتابی سالانه مشهد ۲۸۹۲ ساعت در سال و میانگین سالانه تابش رسیده به سطح زمـین تقریبـاً ۱۹۵ وات بر متر مربع است (۲). در شکل ۱ موقعیّت جغرافیایی شهر مشهد در استان خراسـان رضوی نشان داده شده است.

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شهر مشهد در استان خراسان رضوی



در این مطالعه، پارامترهای دما، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و بارش برای برآورد مقدار تابش رسیده به سطح زمین (R_S) مورد استفاده قرار گرفتند. برای مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با مقادیر واقعی نیز، از داده‌های تابش اندازه گیری شده توسط پیرانومتر که از ابتدای سال ۱۹۸۰ تا پایان ۲۰۰۳ در دسترس بود (به استثنای روزهای حذف شده به دلیل در اختیار نبودن داده) استفاده شد. همچنین مقادیر تابش فرازمینی (R_a) با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده توسط آلن و همکاران (٤) برآورد گردید. ارزشیابی الگوهای برآورد تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین و انتخاب بهترین آن‌ها در دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه انجام شد. مقیاس روزانه برای استفاده مستقیم از داده‌ها انتخاب گردید، اما از آن جا که در بیشتر مطالعات و به ویژه در معادلات برآورد تبخیر- تعرق، محاسبه‌ی تابش به صورت ماهانه صورت می‌گیرد، مقیاس ماهانه نیز مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که پس از بررسی داده‌ها، برای افزایش دقّت محاسبات، مقادیر پرت حذف شده و محاسبات تنها با داده های قابل قبول انجام شد.

معادلات برآورد تابش خورشیدی

همان گونه که ذکر شد برای برآورد میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_S)، تاکنون تلاش‌های فراوانی صورت گرفته و معادلات بسیاری ارائه شده است. در این تحقیق از هفت روش محاسبه‌ی R_S استفاده شد که از بین آن‌ها، چهار الگو برای منطقه‌ی مورد مطالعه، واسنجی شده‌اند. معادله‌های استفاده شده در این مطالعه عبارت‌اند از:

معادله‌ی آنگستروم- پرسکات شماره ۱

این معادله به دلیل سادگی، کاربرد گسترده‌ای در محاسبه‌ی تابش رسیده به سطح زمین دارد و در برآورد تبخیر- تعرق به روش پنمن- مانتیث- فائو برای مناطقی که روش مناسبی برای محاسبه‌ی تابش آن‌ها ارائه نشده و یا مقادیر تابش آن‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد (٤). معادله‌ی آنگستروم- پرسکات به طور کلی به صورت زیر است که در آن ضرایب a و b برای هر منطقه قابل محاسبه است.

$$R_s = R_a(a + b\frac{n}{N}) \qquad (1)$$

فائو این ضرایب را به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ پیشنهاد کرده و بنابراین رابطه‌ی بالا را به شکل زیر ارائه نموده است:

$$R_s = R_a(0.25 + 0.5\frac{n}{N}) \qquad (2)$$

معادله‌ی آنگستروم- پرسکات شماره ۲

این رابطه در واقع همان رابطه‌ی آنگستروم- پرسکات است که در سال ۱۳۷٦ توسط خلیلی و رضایی صدر برای ایستگاه‌های مختلف ایران واسنجی شده و برای شهر مشهد به صورت رابطه‌ی زیر ارائه شده است (۱) :

$$R_s = R_a(0.3 + 0.37\frac{n}{N}) \qquad (3)$$

معادله‌ی آنگستروم- پرسکات شماره ۳

خلیلی و رضایی صدر اعتقاد داشتند که رابطه‌ی آنگستروم- پرسکات تأثیر طیف جذبی بخارآب در اتمسفر را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین معادله‌ی دیگری برای مناطق مختلف ایران به دست آوردند که برای شهر مشهد به صورت زیراست (۱) :

$$R_s = R_a\left[0.51\exp\left(0.35(\frac{n}{N} - RH)\right)\right] \qquad (4)$$

در این معادله، RH میانگین رطوبت نسبی سه دیدبانی بر حسب صدم است.

معادله‌ی آنگستروم- پرسکات شماره ۴

معادله‌ی آنگستروم- پرسکات در سال ۱۳۸۸ توسط علیزاده و خلیلی نیز برای منطقه مشهد واسنجی شده است (۲). در مطالعه‌ی آن‌ها، مقادیر a و b برای مشهد با توجه به داده‌های تابش رسیده به سطح زمین (R_S)، ساعات آفتابی و نیز مقدار تابش فراجوّی (R_a) محاسبه شده

به روش آلن و همکاران (۳) در محیط برنامه نویسی *MATLAB* برآورد شد و نتیجه‌ی آن به صورت زیر ارائه گردید:

$$R_s = R_a(0.23 + 0.44\frac{n}{N}) \qquad (5)$$

معادله‌ی رگرسیونی علیزاده و خلیلی

این معادله توسط علیزاده و خلیلی و با استفاده از پارامترهای بارش، دماهای بیشینه و کمینه، میانگین رطوبت نسبی و کمبود فشار بخار اشباع، به صورت رابطه‌ی زیر ارائه شد (۲):

(٦)

$$R_s = R_a[0.32 + 0.42\frac{n}{N} - 0.0006RH - 0.0028P - 0.0019(T_{max} - T_{min}) - 0.0048D - 0.0007D^2]$$

در این رابطه RH میانگین رطوبت نسبی روزانه (درصد)، P بارش روزانه (میلی‌متر)، T_{max} دمای بیشینه (درجه‌ی سلسیوس)، T_{min} دمای کمینه (درجه‌ی سلسیوس) و D کمبود فشار بخار اشباع (میلی بار) می باشد.

معادله‌ی صباغ

این الگو توسط صباغ در سال ۱۹۷۷ میلادی و به صورت زیر ارائه شد (۱٦) :

$$R_s = 1.53k\exp\left[\frac{L(D - RH^{0.333})}{100 - (\frac{1}{\overline{T}_{max}})}\right] \qquad (7)$$

که در آن L عرض جغرافیایی محل (*rad*)، D نسبت ساعات آفتابی به ۱۲ ساعت $(\frac{n}{12})$، RH میانگین روزانه رطوبت نسبی در ماه مربوط (درصد)، $\overline{T}_{max}$ میانگین بیشینه‌ی دمای روزانه

(درجه‌ی سلسیوس) و ضریب k برای هر محل مقداری است ثابت و بـه صـورت زیـر محاسـبه می‌شود:

$$k = 100(\lambda N + W_{ij} \cos L) \qquad (۸)$$

در این رابطه W_{ij} فاکتور فصلی Reddy (۱٤) است و بین ۱/۷ در دسامبر و ۲/٤۸ در ژوئیه متغیر است. همچنین λ عامل عرض جغرافیایی (nm)و برابر است با:

$$\lambda = \frac{0.2}{(1+0.1\phi)} \qquad (۹)$$

که در آن ϕ عرض جغرافیایی محل (درجه) است. لازم به ذکر است که مقدار تـابش بـه دسـت آمده با استفاده از این الگو به صورت متوسط تابش روزانه در ماه مورد نظر است.

معادله‌ی گلور- مک کلوت (آنگستروم- پرسکات شماره ۵)

گلور و مک‌کلوت ضریب a در رابطه‌ی آنگستروم- پرسکات را به عرض جغرافیـایی ارتبـاط داده و رابطه‌ی زیر را ارائه نمودند(۱) :

$$\frac{R_s}{R_a} = 0.29\cos\phi + 0.52\frac{n}{N} \qquad (۱۰)$$

معیارهای آماری واسنجی (شاخص های خطا سنجی)

در این تحقیق برای ارزشیابی دقت الگوها و مقایسه‌ی نسبی نتایج الگوهای برآوردی با مقـادیر اندازه‌گیری شده تابش رسیده به سطح زمین توسط پیرانومتر، آزمون‌هایی که توسط جاکوویـدز (۱۱) پیشنهاد شده است، انجام شد. جاکوویدز نشان داد که استفاده از شـاخص‌هـای *RMSE*[۱]، *MBE*[۲]به تنهایی، موجب بروز خطا در انتخاب بهترین الگو می‌شود، لـذا توصـیه نمـود کـه در

1. Root Mean Square Error
2. Mean Bios Error

کنار این دو شاخص، از معیار t که ترکیبی از آن‌هاست نیز، استفاده شود. شاخص‌های گفته شده به صورت زیراند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \qquad (۱۱)$$

$$MBE = \frac{\sum_{1}^{n}(P_i - O_i)}{n} \qquad (۱۲)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \qquad (۱۳)$$

در این معادلات P_i مقدار برآورد شده تابش خورشیدی (با استفاده از الگوها)، O_i مقدار اندازه‌گیری‌شده تابش خورشیدی (با استفاده از پیرانومتر) و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش‌های قبل آمد، در این تحقیق برای برآورد میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین از هفت الگوی مختلف استفاده شد و سپس مقادیر برآورده شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تابش توسط پیرانومتر مقایسه شدند. برای راحتی کار به هر یک از معادلات، به ترتیب ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، عددی اختصاص داده شده است و این روابط در جداول با شماره‌های اختصاص داده شده، مشخص شده اند. بنابراین معادله‌ی آنگستروم- پرسکات شماره ۱ با عدد ۱، آنگستروم- پرسکات شماره ۲ با عدد ۲، معادله‌ی آنگستروم- پرسکات شماره ۳ با عدد ۳، معادله‌ی آنگستروم- پرسکات شماره ٤ با عدد ٤، معادله‌ی رگرسیونی علیزاده- خلیلی با عدد ۵، معادله صباغ با شماره ٦ و معادله گلور- مک کلوت با شماره ۷ مشخص شده‌اند. چنان‌که گفته شد، محاسبات در دو مقیاس روزانه و ماهانه انجام شده است و در مقیاس ماهانه متوسط مقادیر روزانه تابش در ماه مورد نظر در نظر گرفته شده

است. جدول ۱ شاخص‌های آماری R^2، *RSME*، *MBE* و t محاسبه شده برای مقیاس روزانه و جدول ۲ همین شاخص‌ها را در مقیاس ماهانه نشان می دهند. شاخص *MBE* تفاوت بین مقدار اندازه‌گیری شده تابش و مقدار برآورد شده آن را منعکس می‌کند و کمینه‌ی مقدار آن نشان‌دهنده‌ی بهترین الگوی تابش است (۱۷). بنابراین به طور کلی برای انتخاب بهترین و مناسب‌ترین معادله‌ی تابش منطقه‌ی مورد مطالعه، باید میزان شاخص‌های *RSME*، *MBE* و t پایین بوده و شاخص R^2 دارای بالاترین مقدار خود باشد. لازم به ذکر است که واحد مقادیر تابش بر حسب مگاژول بر متر مربع بر روز می‌باشد.

جدول ۱. شاخص‌های آماری محاسبه شده برای مقیاس روزانه

t	MBE	RMSE	R^2	شماره معادله
1.57	0.78	4.90	0.639	1
2.18	-1.03	4.69	0.640	2
0.80	-0.37	4.50	0.647	3
1.07	-0.49	4.50	0.643	4
1.64	-0.77	4.63	0.640	5
3.32	4.59	14.15	0.060	6
1.40	0.71	4.95	0.636	7

جدول ۲. شاخص های آماری محاسبه شده برای مقیاس ماهانه

t	MBE	RMSE	R^2	شماره معادله
0.59	0.16	2.68	0.850	1
6.24	-1.60	2.96	0.850	2
3.63	-0.93	2.65	0.850	3
3.80	-1.01	2.76	0.840	4
5.15	-1.34	2.86	0.847	5
8.66	4.10	6.15	0.496	6
0.29	0.08	2.70	0.849	7

نتایج نشان می‌دهند که در مقیاس روزانه با توجه به بـالاترین مقـدار R^2 (برابـر ۰/٦٤٧) بهتـرین روش برای محاسبه‌ی تـابش خورشـیدی رسـیده بـه سـطح زمـین (R_S) معادلـه‌ی شـماره ۳ (آنگستروم- پرسکات شماره ۳ که توسط خلیلی و رضایی صدر و تحت تأثیر طیف جـذبی بخـارآب در اتمسفر واسنجی شده اسـت) می باشد. نگاهی به مقادیر *RMSE* نیز نشان می‌دهد که این معادله مقدار خطای کمتری داشته (٤/٥٠) و بنابراین برتری این الگو تأیید می‌شود. البته مشـاهده مـی-شود که سایر معادلات نیز تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهند و مقادیر R^2 و *RMSE* آن‌ها تقریبـاً در یک سطح هستند. تنها معادله‌ی صباغ (شماره ٦) نتایج نامناسبی را نشان می‌دهد که بـه نظـر می‌رسد به دلیل استفاده از فاکتور Reddy (١٤) است که اولاً به صورت ماهانـه در نظـر گرفتـه می‌شود و ثانیاً مقادیر آن برای ماه های مختلف متفـاوت اسـت (در ایـن جـا متوسـط آن در نظـر گرفته شده است). مقدار *MBE* نیز نشان می‌دهد که تفاوت مقدار برآورد شده بـا مقـدار انـدازه-گیری شده در معادله ۳ قابل‌قبول‌تر است. همچنین این شاخص نشان می‌دهد کـه معـادلات ۱، ٦ و ۷ (به ترتیب معادله پیشنهادی فائو، معادله صباغ و معادله گلـور- مـک‌کلـوت) مقـادیری بیشـتر (مقادیر مثبت) از مقدار واقعی را برآورد می‌کنند و سایر روابط، مقادیر کمتری (مقـادیر منفـی) را برآورد می‌زنند.

در مقیاس ماهانه چنان‌که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقدار *RMSE* باز هم در معادله ۳ کمتر از سایر معادلات است (۲/٦٥) اما مقادیر *MBE* و t برای معادله‌ی شماره ۷ (گلور- مـک کلـوت) نسبت به سایر روابط کم‌تر است و پس از آن، معادله شماره ۱ و معادله شماره ۳ قـرار دارنـد. بنابراین می‌توان گفت با توجه به مقادیر پایین شاخص‌های گفته شده در معادله‌ی ۷ و همچنین به دلیل تفاوت اندک میزان R^2 در معادله‌های ۱ و ۷، می‌توان گفت کـه در مقیـاس ماهانـه ایـن معادله از سایر معادلات مناسب‌تر است. همچنین مشاهده می‌شود که در این مقیاس نیز معادله-ی صباغ نتایج قابل قبولی را ارائه نمی‌دهد، اما با توجه به مقدار R^2، نسبت به مقیاس روزانه از دقت بالاتری برخوردار است (۰/٤٩٦ در برابر ۰/۰٦). بنابراین با توجه به این موضـوع و نیـز بـه دلیل این‌که این معادله نیاز به پارامترها و محاسـبات بیشـتری نسـبت بـه سـایر معـادلات دارد، استفاده ار آن در منطقه‌ی مورد مطالعه سفارش نمی‌شود.

لازم به یادآوری است که چون در مقیاس ماهانه از مقادیر متوسط روزانه در هـر مـاه اسـتفاده شده است و بنابراین خطای مربوط به هر روز در تمام ماه جمع شـده در نتیجـه میـزان خطـای بیشتری را ایجاد می‌کند، لذا توصیه می‌شود که به نتایج داده‌های روزانـه توجـه بیشـتری شـود. بنابراین با توجه به مقیاس روزانه ترتیب اولویت معادلات به شکل جدول ۳، خواهد بود.

جدول ۳. معادلات مورد بررسی به ترتیب اولویت بر اساس مقیاس روزانه

ترتیب اولویت	نام معادله
اولویت اول	معادله آنگستروم- پرسکات ۳ : واسنجی شده توسط خلیلی و رضایی صدر تحت تأثیر بخارآب (شماره ۳)
اولویت دوم	معادله آنگستروم- پرسکات ۲: واسنجی شده توسط خلیلی و رضایی صدر (شماره ۲)
اولویت سوم	معادله رگرسیونی علیزاده و خلیلی (شماره ۵)
اولویت چهارم	معادله آنگستروم- پرسکات٤ : واسنجی شده توسط علیزاده و خلیلی (شماره ٤)
اولویت پنجم	معادله گلور- مک کلوت (شماره ۷)
اولویت ششم	معادله آنگستروم- پرسکات پیشنهادی فائو (شماره ۱)
اولویت هفتم	معادله صباغ (شماره ٦) (توصیه نمی شود)

قدردانی و سپاس

نگارندگان مقاله بدین‌وسیله از حمایت و مساعدت معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسـی مشـهد برای انجام این تحقیق در قالب طرح تحقیقاتی شماره ۲/ ١٦٣٣٠ ، قدردانی و سپاسگزاری مـی نمایند.

منابع و مآخذ

۱. خلیلی، ع. و رضایی صدر، ح.، (۱۳۷٦)، «***تخمین تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده های اقلیمی***»، فصلنامه‌ی تحقیقات جغرافیایی، شماره ٤٦: ۱۵ تا ۳۵.

۲. علیزاده، ا. و خلیلی، ن.، (۱۳۸۸)، «***تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی تخمین تابش خورشیدی (مطالعه موردی : منطقه مشهد)***»، مجله‌ی علوم و صنایع کشاورزی (آب و خاک)، جلد ۲۳، شماره ۱، ۲۳۸-۲۲۹.

۳. موسوی بایگی، م. ، اشرف، ب. و میان آبادی، آ، ۱۳۸۹، «***بررسی مدل های مختلف برآورد تابش خورشیدی به منظور معرفی مناسب ترین مدل در یک اقلیم نیمه خشک***»، مجله آب و خاک جلد ٢٤ ، شماره ٤، ص ٨٣٦ تا ٨٤٤.

4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998, *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage, Paper No 56, Rome.
5. Almorox, J., Benito, M., Hontoria, C., 2005, *Estimation of monthly Angstrom–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo*, Spain, Renewable Energy 30, 931–936.
6. Angstrom, A., 1924. *Solar and terrestrial radiation*. Quart. J. Roy.Meteorol. Soc. 50, 121–125.
7. Bristow, K.L., Campbell, G.S., 1984. *On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature*. Agric. Forest. Meteorol. 31, 159–166.
8. Ehnberg, J.S.G., Bollen, M.H.J., 2005. *Simulation of global solar radiation based on cloud observations*. Solar Energy 78, 157–162.
9. Elagib, N. A., Babiker, Sh. F. and Alvi, Sh. H., 1998, *New empirical models for global solar radiation over Bahrain*, Energy Conversion and Management, Mgmt 39(8), 827-835.
10. Iziomon, M. G. and Mayer, H., 2002, *Assessment of some global solar radiation parameterizations*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 64, 1631–1643.
11. Jacovides, C. P., 1997, *Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models*. Agricultural water management 3:95-97.
12. Lopez, G., Rubio, M. A. and Batlles, F. J.,2000, *Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain*, Renewable Energy, 21, 175-186.

13. Prescott, J.A., 1940. *Evaporation from water surface in relation to solar radiation*. Trans. Roy. Soc. Austr. 64, 114–125.
14. Reddy, S. J., 1971, *An empirical method for the estimation of total solar radiation*. Solar Energy, 13, 289-291.
15. Rehman, Sh, 1998, *Solar radiation over Saudi Arabia and comparisons with empirical models*, Energy, 23(12), 1077–1082.
16. Sabbagh, J., Sayigh, Aam., Al-Salam, EMA, 1997, *Estimation of the total solar radiation from meteorological data*, Solar Energy, 19, 307-311.
17. Sabziparvar, A. A. and Shetaee, H., 2007, *Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran*, Energy 32, 649–655.
18. Skeiker, K., 2006, *Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province*, Syria, Energy Conversion and Management, Mgmt, 47, 331-345.
19. Sozne, A., 2005, *Solar energy potential in Turkey*, Applied Energy 80, 367-381.
20. Togrul, I. T. and Onat, E., 1999, *A study for estimating solar radiation in Elazig using geographical and meteorological data*, Energy Conversion & Management 40, 1577-1584.
21. Yang, K., Koike, T. and Ye, B., 2006, *Improving estimation of hourly*, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets, Agricultural and Forest Meteorology 137, 43–55.